

LA MACHINE SYNCHRONES

I.1 Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche.

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants.

Notre étude se bornera ici à considérer l'aspect génératrice, on l'appelle plus particulièrement: alternateur.

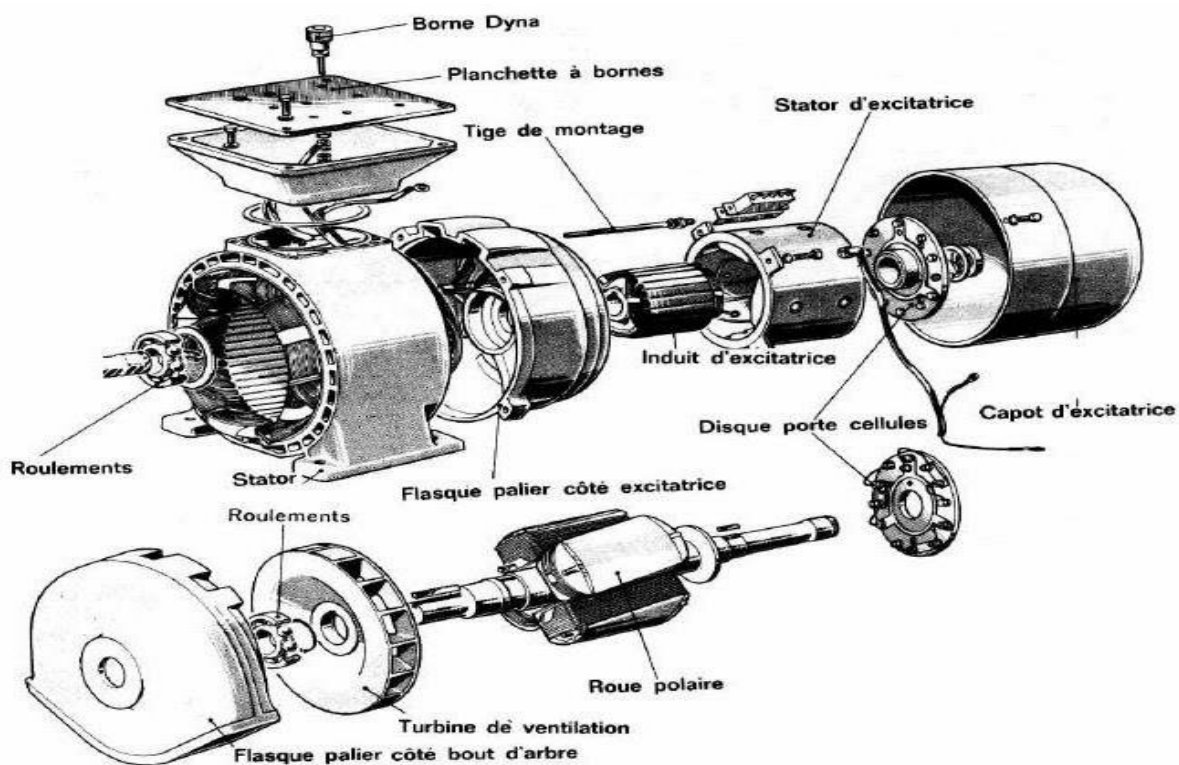


Fig. I.1 Vue éclatée d'un alternateur expérimental (Moteurs Leroy)

I.2 Définition [1]

Les alternateurs sont des machines tournantes, leur puissance apparente est comprise entre quelque centaines de VA pour les plus petites et plus de 1600 MVA pour les plus grosses unités. L'alternateur transforme l'énergie mécanique qui lui est fournie par la machine qui l'entraîne en énergie électrique; il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux.

Les f.e.m sont produites par inducteur c'est-à-dire par déplacement relatif d'un circuit inducteur avec une vitesse de rotation «N» égale la vitesse de rotation du champ tournant où de synchronisme «Ns», d'où le nom de la machine synchrone.

$$N=N_s=60f/p \quad [\text{tr/min}]$$

Avec p : Nombre de paires de pôles.

f : Fréquence du réseau [Hz]

I.3 Description de la machine synchrone à pôles lisses

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, de la partie tournante appelée rotor. L'entrefer est l'espace aménagé entre les deux armatures ; il est constant.

I.3.1 Stator (induit) [2]

Comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitué de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé.

Parcouru par un système de courant équilibré, il produit un champ tournant : le stator est donc identique à celui de la machine asynchrone.

Le stator constitue l'induit de la machine puisqu'il est traversé par le champ inducteur produit par le rotor. Le courant induit peut être fourni (cas générateur) ou absorbé (cas moteur).

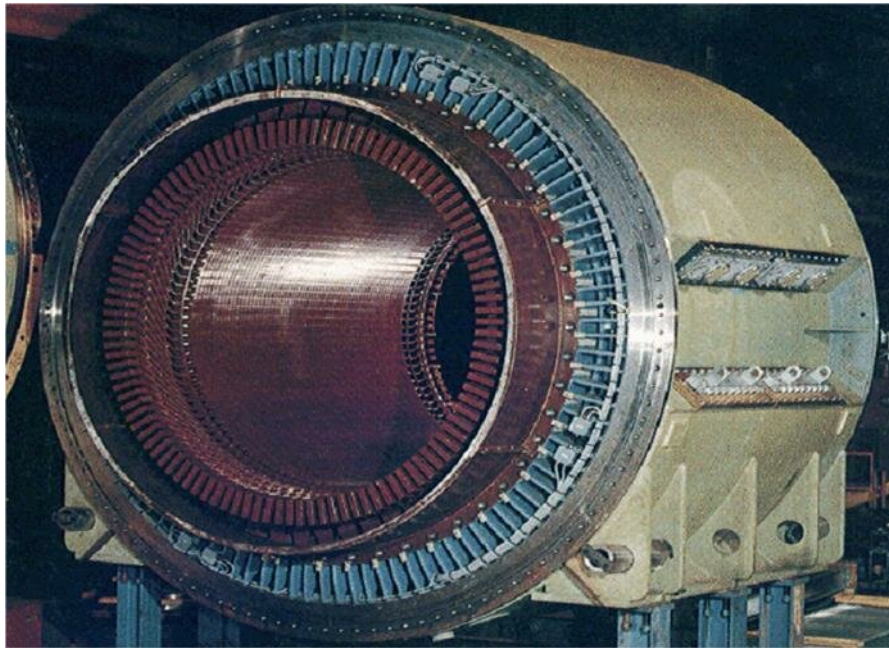


Fig. I.2 Stator

I.3.2 Rotor (inducteur)

Le rotor dans les machines à pôles lisses est généralement constitué par un cylindre ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage inducteur. Ces machines comportent généralement deux à quatre pôles (turbo-alternateurs).

Ce type de construction, caractérisé par un entrefer constant, est utilisé pour les machines de fortes puissances destinées à tourner à grandes vitesses.

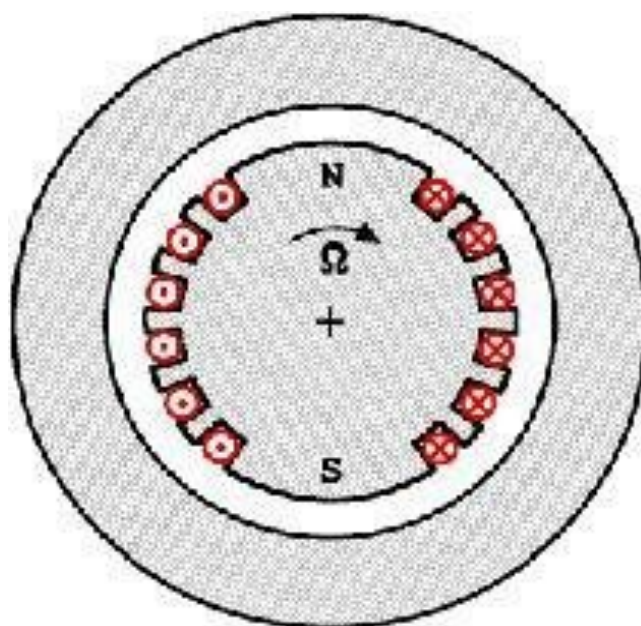


Fig. I.3 Rotor

I.4 Champ tournant [10]

On appelle champ tournant, la portion de l'espace où existe un champ magnétique de valeur constante dans la même direction avec une vitesse angulaire constant ω_s . Les courants alternatifs dont le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse Ω_s défini par :

$$\Omega_s = \omega / p$$

$$2\pi N_s = 2\pi f / p$$

Donc $N_s = 60f / p$ [trs/min]

Avec Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant [rad/s].

ω : pulsation des courants alternatifs [rad/s].

N_s : vitesse de rotation [trs/min].

f : fréquence des courants alternatifs [Hz].

p : nombre de paires de pôles.

I.5 Principe de fonctionnement de l'alternateur [3]

Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation de façon mécanique à la vitesse de synchronisme. Le courant continu circulant dans l'enroulement du rotor engendre dans l'entrefer un champ magnétique dont la composante fondamentale sinusoïdale comporte $2p$ pôles.

La théorie des champs glissants montre que le bobinage du stator est le siège de forces électromotrices triphasées, dont la composante fondamentale est de pulsation $\omega = p\Omega_r$. Dans les réseaux électriques, l'ensemble des alternateurs des différentes centrales sont connectés en parallèle sur le même réseau, et produisent des tensions de même fréquence.

I.6 Modèle d'étude en régime permanent

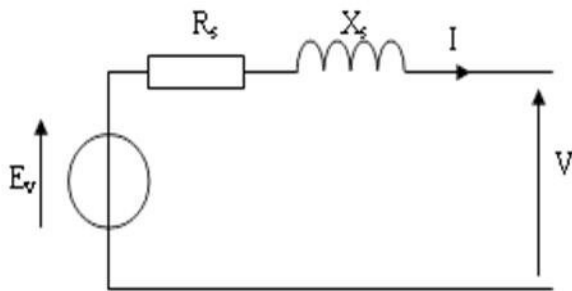
I.6.1 Modèle de Behn-Eschenburg [4]

Le modèle de Behn-Eschenburg est très intéressant par sa simplicité. Cependant, il peut conduire à des erreurs importantes et il n'est valable que dans la zone linéaire. Il est utilisé pour la machine à pôles lisses qui a une seule réactance. La machine est supposée non saturée.

L'équation de fonctionnement est alors :

$$\overline{E_v} = \overline{V} + R \cdot \overline{I} + jX_s \cdot \overline{I} \quad (I.1)$$

I.6.1.1 Schéma équivalent d'une phase



E_v : Fem

V : Tension aux bornes d'un enroulement

R_s : Résistance de l'enroulement

$X_s = L_s \cdot \omega$: Réactance synchrone.

L_s : Inductance synchrone

ω : Pulsation électrique

I.6.1.2 Construction du diagramme de BehnEschenburg

Connaissant l'impédance

$$Z = R + jL_s \cdot \omega \quad (I.2)$$

Avec: R_s qui est facilement mesurable (méthode volt-ampermétrique)

$X_s = L_s \cdot \omega$ Réactance constante par hypothèse (machine non saturée). On le détermine à partir de la caractéristique à vide $E_v(J)$ et en court-circuit $I_{cc}(J)$.

J : est connu

$E_v(J)$: donne E_v

$I_{cc}(J)$: donne I_{cc}

En court-circuit ($V=0$), avec la même valeur de J :

$$E_v = Z_s \times I_c \quad (I.3)$$

$$Z_s = \frac{E_v}{I_c} \quad (I.4)$$

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad (I.5)$$

$$X_s = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (I.6)$$

On peut déterminer Z_s à partir de la courbe $E_v(J)$ et la courbe $I_{cc}(J)$.

Pour la même valeur de J dans la zone linéaire :

$$Z_s = \frac{A}{A}$$

Pour une autre valeur de J' dans la zone de saturation, on trouve une autre valeur pour Z_s .

On tient compte alors de la saturation :

$$Z_s = \frac{A'C'}{A'B'}$$

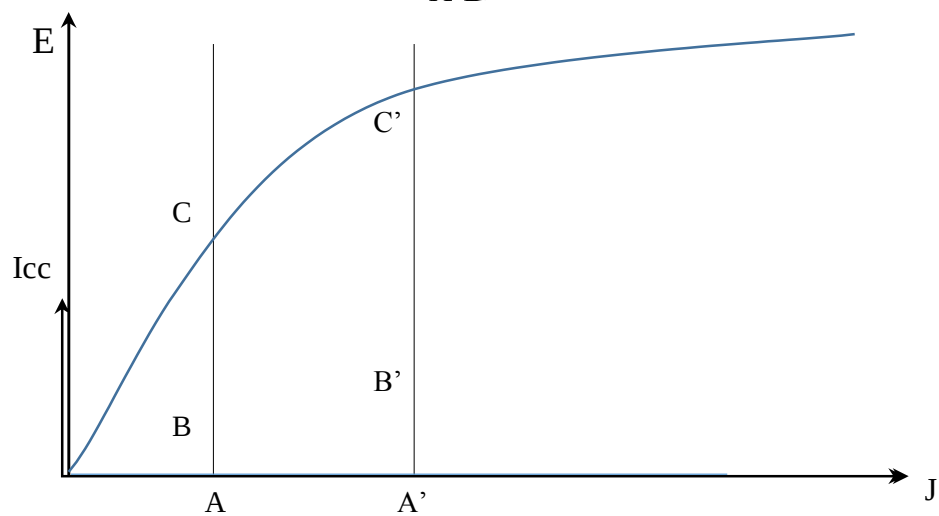


Fig. 1.4 Détermination graphique

Le diagramme se présente comme suit :

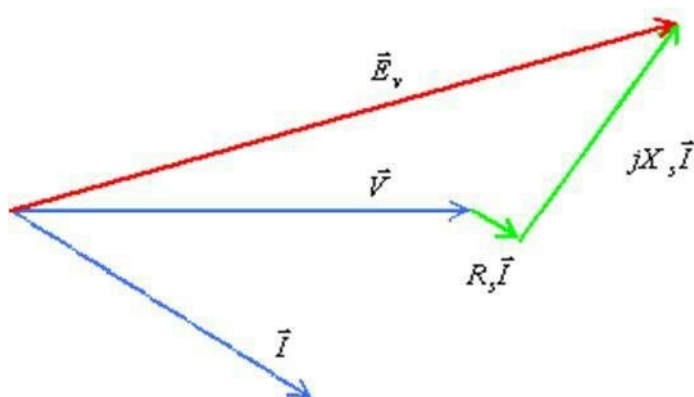


Fig. I.5 Diagramme de BehnEschenburg

I.6.2 Modèle de Potier [5]

Le modèle de Potier d'une machine synchrone saturée à pôles lisses, est caractérisé par deux paramètres : le coefficient d'équivalence α et la réactance de fuite $\lambda\omega$. De façon classique, ces paramètres se déterminent graphiquement à partir de caractéristiques relevées lors de la réalisation de trois essais sur la machine : un essai à vide, un essai en court-circuit et un essai en déwatté.

Les équations générales du modèle de Potier d'une machine synchrone à pôles lisses pouvant être saturé, sont les suivantes :

$$\bar{V} = \bar{E}_r - R\bar{I} - j\omega\bar{I} \quad (I.7)$$

$$\bar{J}_e = \bar{J}_{ec} - \alpha\bar{I} \quad (I.8)$$

Dans l'équation aux tensions, $\bar{V}$ désigne la tension d'une phase de l'alternateur et $\bar{I}$ le courant d'induit débité. $\bar{E}_r$ traduit la force électromotrice induite par les variations du flux ϕ_r et $\lambda\omega\bar{I}$ représente la chute de tension interne due au flux de fuite ϕ_f . R désigne la résistance d'une phase de l'induit de la machine. [5]

L'équation aux intensités établit une relation entre le terme $\alpha\bar{I}$, le courant d'excitation réel J_e de la roue polaire et le courant d'excitation fictif J_{eo} introduit par Potier. J_{eo} est lié à la force électromotrice induite E_r , par la caractéristique interne de la machine. [5]

I.6.2.1 Diagramme du modèle de Potier

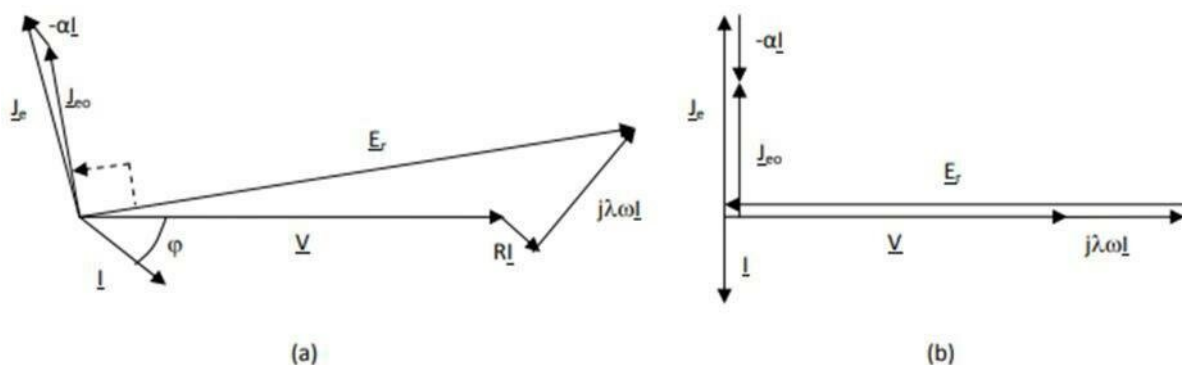


Fig. I.6 Diagrammes vectoriels d'une MS débitant sur (a) charge R-L, (b) charge purement inductive

I.6.2.2 Détermination graphique des paramètres de Potier

La méthode que Potier a proposé pour déterminer les paramètres α et $\lambda\omega$, est purement graphique. Trois essais à vitesse de rotation constante, sont nécessaires à sa mise en œuvre :

- Un essai à vide qui permet de tracer la caractéristique interne $E_r = f(J_{e0})$,
- Un essai en déwatté relevé à courant d'induit I_1 et permettant d'obtenir le point H(J_{e1} , V_1),
- Un essai en court-circuit qui permet de placer le point C. Celui-ci est relevé pour un courant d'excitation J_{ecc1} tel que le courant de court-circuit I_{cc} soit égal au courant d'induit I_1 de l'essai en déwatté. [5]

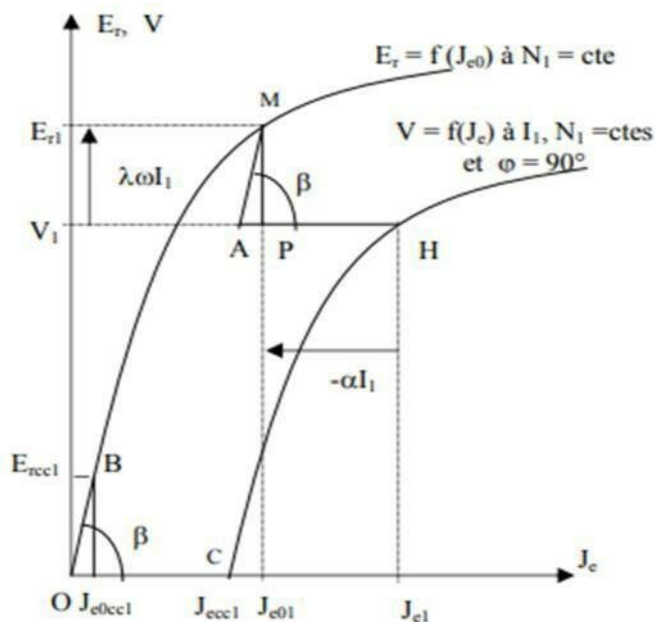


Fig. I.7 Détermination graphique des paramètres

I.7 Avantages et inconvénients de la machine synchrone [10]

I.7.1 Avantages

- Sa vitesse est constante quel que soit la charge.
- Elle fonctionne en compensateur synchrone, ce qui la rend capable d'améliorer le facteur de puissance des installations.
- Elle peut supporter des chutes de tension relativement importantes.
- Très bon rendement entre 93% et 97%.
- L'entrefer peut être choisi relativement important.

I.7.2 Inconvénients

- Elle présente des difficultés au démarrage.
- Pour le fonctionnement moteur ; s'il vient à décrocher, elle s'arrête et il faut alors reprendre tout le processus de démarrage.
- La présence de l'inducteur à courant continu rend la machine synchrone (moteur) plus coûteuse qu'une machine asynchrone, et nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.

Utilisation de